

С.А. ГАСПАРЯН, С.Х. ГЕВОРКЯН, Г.Г. ШЕКЯН, З.М. АРУТЮНЯН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Բերված են տարբեր կազմության ու ձևի բնօրինակ բաղադրությունների արդյունավետ կոշտության բնութագրերի որոշման փորձարկման մեթոդիկան և դրանց արդյունքները: Դիտարկված են առաձգականության արդյունադար մոդուլների հաշվարկի տարբեր տեսական մոդելներ և ստացված արդյունքների հիմքով կատարվել է դրանց հարաբերական գնահատումը:

Приведены методика экспериментов и их результаты по определению эффективных характеристик жесткости различных по форме и строению волокнистых композитов. Рассмотрены различные модели расчета эффективных модулей упругости и дана их сравнительная оценка на базе полученных экспериментальных данных.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Methods of experiments and their results for determining effective characteristics of stiffness of fibre reinforced composites of different structure and form are adduced. Different theoretical models for determining the effective modulus of elasticity are considered with the comparative evaluation on the base of obtained experimental results is adhered.

Ил. 3. Табл. 1. Ref. 3.

Для композиционных материалов важное значение имеет знание упругих свойств, т.к. они в основном определяют прочностные и жесткостные характеристики конструкций их композитов. Имея в виду, что композит является материалом, изготовление которого, подобно конструкции, требует получения материала с заранее задаваемыми свойствами, их прогнозирование желательно выявлять посредством аналитической оценки через упругие характеристики компонентов композита. Отметим, что таких попыток аналитической оценки на основе теории гетерогенных сред и других - изрядное количество, следовательно, достигнутые в этой области результаты должны быть критически оценены с точки зрения практики.

Для этой цели проведены испытания двух различных по составу и форме волокнистых (одно- и перекрестно) армированных композитов с неметаллической и металлической матрицами - стеклопластик с матрицей эпоксидной смолы в виде полого цилиндра и боралюминий в виде пластины. Объемное содержание армирующего волокна в обоих композитах составляло 50 %. Стеклопластиковый композит испытывали на образцах в виде разрезанных на кольца цилиндров с внешним и внутренним диаметрами  $d=80$  мм,  $d_1=72$  мм, шириной 15 мм. Было изготовлено специальное приспособление, позволяющее растягивать кольцевые образцы с помощью двух полудисков, выполненных точно по внутреннему диаметру кольца, с тем, чтобы в сечениях кольца возникли только растягивающие усилия. В

силу симметрии кольца и нагрузки в сечениях кольца под измеряемыми участками имеет место одноосное напряженное состояние (рис. 1).

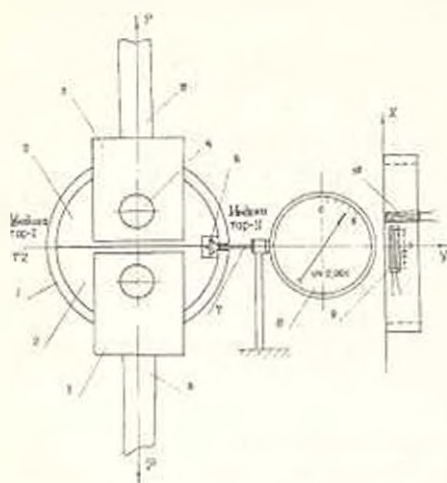


Рис. 1. Схема испытания кольцевого образца:  
1 - испытуемое кольцо, 2 - полудиски, 3 - вилки, 4 - палец, 5 - держатель, 6 - обратный наконечник, 7 - шток индикатора, 8 - индикатор изменения внутреннего диаметра кольца, 9 - тензодатчик тангенциальной деформации, 10 - индикатор осевой деформации, 11 - индикатор изменения наружного диаметра.

Относительная деформация по оси Z (в радиальном направлении) рассчитывалась, как  $\epsilon_z = \Delta' / \delta$ , а напряжение в окружном направлении -  $\sigma_r = F / 2\ell\delta$ , где F — усилие растяжки кольца;  $\ell\delta$  — ширина и толщина стенки кольца;  $\Delta'$  — деформация толщины стенки.

Испытание боралюминия плоских прямоугольных образцов (рис. 2) размерами  $\ell = 120$  мм и  $b = 40$  мм, выбранными из условия влияния их на предел продольной прочности и вырезанными электроэрозионным методом для уменьшения остаточных деформаций, проводилось на универсальной испытательной машине УМЭ-10ТМ с электротензометрическим измерением напряжений и деформаций.

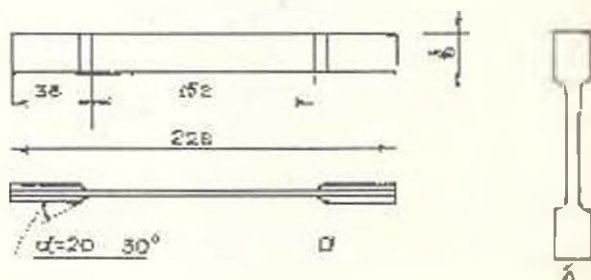


Рис. 2. Образцы для испытаний боралюминия на растяжение:  
а - с накладками из стеклотекстолита;  
б - двусторонняя лопатка.

Рассматривая композит как среду, обладающую симметрией свойств в плоскости, перпендикулярной направлению ориентации волокон, по известным соотношениям [1] "напряжение-деформация" определяли жесткости среды, значения которых в виде характеристик приведены в таблице.

Таблица

Механические свойства композиционных материалов по результатам экспериментов

| Материал                           | Предел прочности, МПа | Модуль упругости, $10^{10}$ Па | Модуль сдвига, $10^{10}$ Па | Козфф. Пуассона |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Боралюминий:                       |                       |                                |                             |                 |
| угол армирования $\alpha=0$ ,      | 987                   | 18,9                           | -                           | -               |
| угол армирования $\alpha=90^\circ$ | 65                    | 11,5                           |                             |                 |
| Стеклоткань-эпоксидное связующее:  |                       |                                |                             |                 |
| продольное направление,            | 606                   | 1,24                           | 0,516                       | 0,205           |
| радиальное направление             | 440                   | 1,34                           | 0,570                       | 0,174           |

Для определения этих эффективных свойств через свойства отдельных фаз значения последних заимствованы из [2, 3].

Вариационный метод вычисления эффективных модулей упругости был предложен Хашином и Штрикманом, целью которого является сужение области Хилла. Применение вариационного метода для вычисления модулей упругости двухкомпонентных композитов приводит к следующим расчетным формулам [4]:

$$V_2 \left[ 1 + V_1 \frac{K_2 - K_1}{K_1 + K_-} \right]^{-1} \leq \frac{K^* - K_1}{K_2 - K_1} \leq \left[ 1 + V_1 \frac{K_2 - K_1}{K_1 + K_+} \right] \quad (1)$$

$$V_2 \left[ 1 + V_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_-} \right]^{-1} \leq \frac{\mu^* - \mu_1}{\mu_2 - \mu_1} \leq \left[ 1 + V_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_+} \right]$$

где

$$K_- = \frac{4}{3}\mu_1, \quad K_+ = \frac{4}{3}\mu_2,$$

$$\frac{1}{\mu_-} = \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{\mu_1} + \frac{10}{9K_1 + 8\mu_1} \right], \quad \frac{1}{\mu_+} = \frac{2}{3} \left[ \frac{1}{\mu_2} + \frac{10}{9K_2 + 8\mu_2} \right].$$

$V_1$  — объемная концентрация,  $K_1$  — модуль всестороннего сжатия или объемный модуль,  $\mu_1$  — модуль сдвига.

Формула (1) для расчета эффективных модулей упругости не учитывает связности компонентов, вследствие чего приводит к значительному рассеянию результатов. Известно, что система "мягкая матрица - жесткие включения" должна обладать эффективными модулями упругости, лежащими вблизи нижней границы Хашина-Штрикмана, а система "жесткая матрица-мягкие волокна", в том числе пористые среды и материалы с трещинами - вблизи верхней [4].

Для матричных смесей с периодическим расположением включений правильной формы был разработан метод вычисления более узкой области.

чем область Хашина-Штрикмана для расчета эффективных модулей упругости, когда учитывается однородность деформированного состояния на гранях элементарных ячеек прямоугольной решетки при неоднородности напряженно-деформированного состояния внутри ячеек.

Применительно к двухфазному композиту для вычисления эффективных величин поперечного модуля сдвига и объемного модуля плоских деформаций Йехом получены зависимости [5]:

$$\mu_* = \frac{\mu_1 \mu_m}{V_m \mu_1 + V_1 \mu_m}, \quad \mu_u = \frac{\mu_m [(1 - \alpha) \mu_m + \alpha \mu_1]}{(1 - \alpha + \alpha^2) \mu_m + \alpha (1 - \alpha) \mu_1}, \quad (2)$$

$$K_* = \frac{K_1 K_m}{V_m K_1 + V_1 K_m}, \quad K_u = \frac{K_m [(1 - \alpha) K_m + \alpha K_1]}{(1 - \alpha + \alpha^2) K_m + \alpha (1 - \alpha) K_1}, \quad (3)$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_m$  — модули сдвига волокон и матрицы;  $\mu_u$ ,  $\mu_*$  — верхняя и нижняя границы вилки для эффективных модулей упругости;  $K_1$ ,  $K_m$  — объемные модули плоских деформаций волокон и матрицы;  $V_1 = \alpha^3$ ,  $V_m = 1 - \alpha^3$  — объемная концентрация.

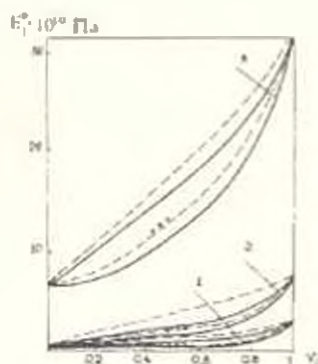


Рис. 3. Эффективный модуль  
1 — сдвига  $\mu^*$  стеклопластика.  
2 — упругости  $E_1$  стеклопластика.  
3 — упругости  $E_1$  боралюминия.

$V_m = 0,35$ . Как видно (рис. 3), экспериментальные точки лежат вблизи нижней границы области Хашина-Штрикмана и согласуются с областью Йеха. Аналогичные результаты получены для боралюминиевого композиционного материала (рис. 3), для которого  $E_1 = 31 \cdot 10^{10}$  Па,  $E_m = 6,8 \cdot 10^{10}$  Па,  $v_1 = 0,3$ ,  $v_m = 0,3$ .

Другие эффективные характеристики (продольный модуль Юнга  $E_*$  и соответствующий ему коэффициент Пуассона  $\nu_*$ ) можно выразить через  $K^*$  при помощи соотношений, предложенных [6]. Пятую эффективную характеристику (поперечный модуль Юнга) можно определить при помощи соотношения

$$1/E_* = 1/4\mu^* + 1/4K^* + \nu_*^2/E_*$$

где  $\mu^*$ ,  $K^*$ ,  $E_*$  и  $\nu_*$  определяются согласно (2), (3). На рис. 3 представлены области Йеха (сплошные линии), Хашина-Штрикмана (штриховые линии) и экспериментальные данные (точки) для композита "стекловолокно", для которого

$$E_1 = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}, E_m = 0,32 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \nu_1 = 0,25,$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. - М.: Мир, 1982. - 334 с.
2. Портной К.И. и др. Структура и свойства композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1979. - 255 с.
3. Справочник по композиционным материалам. В двух кн. / Под ред. Дж. Любиня. - М.: Машиностроение, 1988. - 584 с.



4. Hashin Z., Shtrikman S. On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity // J. Mech. Phys. Solids. - 1962. - 10, N 4. - 335 p.
5. Jeh R.H.T. Variational bounds of unidirectional fiberreinforces composites // J. Appl. Phys. - 1973. - 44, N 2. - 662 p.
6. Hill R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials I. elastic behaviour // J. Mech. Phys. Solids. - 1964. - 12, N 4. - 199 p.

ГИУА

24.05.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 2, 1996, с. 63- 66.

УДК 621.9.06.012

МАШИНОСТРОЕНИЕ

З.А. МАНВЕЛЯН

## РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА

Մանիպուլյատորի մախագծման ուղղագծային հարմարադասման փուլում նոր ստեղծվող կառուցվածքը վերջնականորեն կարելի է գնահատել միայն դինամիկական հաշվարկի հիման վրա. որտեղ հաշվի են առնվում արագության փոփոխությունը և շարժվող զանգվածների իներտությունը: Ստացված բանձները հնարավորություն են ընձեռում մախագծման փուլում հիմնավորված ընտրելու մանիպուլյատորի շարժաբերի պարամետրերը, քանի որ կարելի է հաշվարկել այն ճիգերն ու մոմենտները որոնք զարգացնում է մանիպուլյատորի շարժաբերը:

На стадии эскизного проектирования создаваемый вариант конструкции манипулятора окончательно можно оценить лишь на основе динамических расчетов, при которых учитываются изменение скорости в процессе движения и инертность движущихся масс. Полученные формулы позволяют на стадии проектирования обоснованно выбирать параметры приводов механизмов манипулятора, так как можно рассчитать моменты и усилия, развиваемые приводами.

Ил. 1. Библиогр.: 4 назв.

In sketch design stage this manipulator construction can definitively be estimated only on the basis of dynamic calculations and the change of the speed in motion process and inertia of moving masses are taken into account. The obtained formulas permitted to select the parameters of the manipulator mechanism drives on the stage of designing, as it is possible to calculate the moment and force developed by the drives.

Ил 1. Ref. 4.

Исполнительные механизмы манипуляторов являются механическими системами со сложным динамическим поведением, определяющими взаимодействие отдельных степеней подвижности и нелинейные эффекты, обусловленные кориолисовыми и центробежными силами.

Возросшие требования к качеству функционирования роботов, увеличение скоростей их движения и требуемой точности приводят к необходимости учета динамических характеристик манипуляторов при построении систем управления и конструкции манипулятора. Еще на стадии эскизного проектирования создаваемый вариант конструкции манипулятора